

## Technische Information



## Auf der Suche nach der Nadel im Heuhaufen.

**Megawatt, Nanogramm, ppb und andere exotische Maßeinheiten**

**Von Dr. H. Schultheis, Leverkusen**

Das Vorstellungsvermögen des Menschen für Maß und Zahl ist auf seine täglich erlebte Umwelt bezogen: Jeder „hat im Gefühl“, wie schwer ein Kilogramm wiegt, kaum jemand hat Schwierigkeiten, mit beiden Händen einen halben Meter anzuzeigen, und wie lange eine Stunde dauert, weiß jeder, der einmal hat warten müssen. Bei tausend Tonnen, einem hundertstel Millimeter und 4000 Jahren spürt man bereits die Grenze der Vorstellbarkeit, und bei Lichtjahren, Nanosekunden und ppb (parts per billion) kapituliert das Begriffsvermögen meist völlig.

Früher war der Gebrauch derart „exotischer“ Maßeinheiten nur Spezialisten aus den Naturwissenschaften geläufig; heutzutage findet man aber diese Bezeichnungen mehrmals in der Woche in der Tagespresse, wenn von Megawatt für die Leistung eines Kraftwerks, von Mikrogrammen bei der Entdeckung eines neuen Hormons oder von 3,7 ppb einer Verunreinigung im Grundwasser berichtet wird.

Diese ungewohnten Maß-Systeme können jedoch durch geeignete Vergleiche in ihrer Bedeutung verständlicher gemacht werden. Aber auch dann werden sich die wenigsten die „Menge“ eines Nanogramms, d. h. eines milliardstel Gramms, wirklich „vorstellen“ können.

Für Länge, Gewicht, Zeit, elektrische Spannung usw. gibt es festgesetzte Maßeinheiten, also Meter, Gramm, Sekunde und Volt. Da aber bereits im täglichen Leben sehr große Vielfache oder sehr kleine Teile einer solchen Maßeinheit vorkommen, hat man sich darauf geeinigt, daneben noch Einheiten des 100- bzw. 1000fachen oder des hundertsten bzw. tausendsten Teiles zu benutzen, wodurch die Zahlen „handlicher“ werden:

So sind 2700 m eben 2,7 km (Kilometer), und 0,01 g sind 10 mg (Milligramm). Außer den bekannten vervielfachenden (kilo-, von griechisch chilioi = 1000) oder teilenden Vorsilben (milli-, von lateinisch mille = 1000) gibt es nun noch nach beiden Richtungen weitere, die jeweils die Vergrößerung oder Verkleinerung der Maßeinheit um das Millionen-, Milliarden- oder Billionenfache bedeutet.

Hier sind wir nun im Bereich der großen Zahlen mit den vielen Nullen:

1 Milliarde (1 000 000 000) hat 9, eine Billion (1 000 000 000 000) 12 Nullen. Man kann sich diese umständliche Schreibweise sehr vereinfachen:

$1000 = 10 \cdot 10 \cdot 10 = 10^3$   
(gesprochen „zehn hoch drei“);

$0,01 = \frac{1}{10 \cdot 10} = \frac{1}{10^2} = 10^{-2}$   
(„zehn hoch minus zwei“).

Diese „Zehnerpotenzen“ bieten eine außerordentliche Erleichterung der sprachlichen und schriftlichen Bewältigung sehr großer oder sehr kleiner Zahlen und werden in der Praxis vielfach häufiger verwendet als die oben erwähnten Vorsilben.

Die folgende Tabelle zeigt Vorsilben und Zehnerpotenzen zusammenfassend:

T	Tera-:	$10^{12}$	=	1 000 000 000 000
G	Giga-:	$10^9$	=	1 000 000 000
M	Mega-:	$10^6$	=	1 000 000
K	Kilo-:	$10^3$	=	1 000
h	Hekto-:	$10^2$	=	100
D	Deka-:	$10$	=	10
d	Dezi-:	$10^{-1}$	=	0,1
c	Zenti-:	$10^{-2}$	=	0,01
m	Milli-:	$10^{-3}$	=	0,001
$\mu$	Mikro-:	$10^{-6}$	=	0,000 001
n	Nano-:	$10^{-9}$	=	0,000 000 001
P	Pico-:	$10^{-12}$	=	0,000 000 000 001

Die Vorsilben sind sprachlich den entsprechenden griechischen oder lateinischen Zahlwörtern oder anderen Begriffen entlehnt, z. B. Teras (gr.) = Ungeheuer; Gigas (gr.) = Riese; megas bzw. mikros (gr.) = groß bzw. klein; Nanus (lat.) = Zwerg und dergleichen.

600 MW (Megawatt) sind also 600 Millionen Watt oder  $600 \cdot 10^6 = 6 \cdot 10^8$  Watt.

2 ng (Nanogramm) sind 0,000 000 002 g (zwei milliardstel Gramm) oder  $2 \cdot 10^{-9}$  g.

Hier zeigt sich eine gewisse Gefahr: m- (Milli-) und n- (Nano-) liegen um das Millionenfache (!) auseinander! Zwischen ihnen liegt Mikro-, das unglücklicherweise mit dem griechischen Buchstaben  $\mu$  (my) bezeichnet wird, so daß allein durch Tipp- und Schreibfehler geradezu haarsträubende Falschangaben und Mißverständnisse möglich sind. Der Gebrauch von Zehnerpotenzen ist da viel sicherer.

Allein die Feststellung, daß 1 Million (!) Nanogramm erst 1 Milligramm ergeben, zeigt die außerordentlichen Schwierigkeiten, die der Mensch besonders in der Vorstellung des „sehr Kleinen“ hat. Aber auch mit den „großen Zahlen“ ist das nicht ganz einfach: Wer 1 Million DM besitzt und täglich 1000 DM davon ausgibt, kann immerhin 2 Jahre und 9 Monate auf diese Weise leben; wer aber 1 Milliarde DM besitzt – und solche Leute gibt es ja –, könnte diesen Lebensstil theoretisch 2700 Jahre lang genießen (dabei ist eine Verzinsung nicht berücksichtigt: Bei 5 Prozent würde sich das Kapital trotz des täglichen Abzugs von 1000 DM immer noch weiter vermehren). Dieses Beispiel zeigt auch, daß der Gebrauch der vervielfachenden Vorsilben völlig willkürlich ist, denn kein Mensch spricht von 15 Megamark, wenn er 15 Millionen DM meint; und während in der Physik der Begriff Nanometer ( $10^{-9}$  m) durchaus gebräuchlich ist, verwendet die Astronomie die Einheit „Gigameter“ ( $10^9$  m) nicht. Das „klassische“ astronomische Längenmaß ist das Lichtjahr\*, also jene Strecke, die das Licht mit seiner Geschwindigkeit von 300 000 km / Sekunde in einem Jahr (!) zurücklegt, also 300 000 mal 60 mal 60 mal 24 mal 365 = etwa 9 500 000 000 000 (9,5 Billionen) km. Es gibt übrigens Sternensysteme, die einige Milliarden Lichtjahre von uns entfernt sind. (In Zehnerpotenzen wären das zwischen  $10^{18}$  und  $10^{19}$  km!) Wer könnte sich das vorstellen?

---

\* Neuzeitlicher ist die Einheit „Parsec“ (pc), d. h. die Entfernung, aus der der Erdbahnhalmesser unter einem Winkel von 1 Bogensekunde erscheint, entsprechend etwa 3,26 Lichtjahren oder  $3,0833 \cdot 10^{13}$  km.

Auf unserer Erde ist aber gerade das Kleinste oft viel wichtiger geworden: Besonders im Zusammenhang mit Umweltproblemen tauchen immer wieder die Milli-, Mikro- und Nanogramm auf. Man will wissen – oder anprangern –, wieviel eines bestimmten Fremdstoffes in 1 Liter Rheinwasser oder Nordseewasser ist. Dann rechnet man nicht mehr allein mit den Gewichtseinheiten, sondern bezieht sie auf eine vorgegebene Gewichts- oder Volumeneinheit, also z. B. auf 1 Liter oder bei Luft auf  $1 \text{ m}^3$  (Kubikmeter). Auf diese Weise erhält man die Konzentration eines Stoffes in einem vorgegebenen Medium. Bei Wasseranalysen kommen dann Werte wie z. B. 2,7 mg / l, 0,3  $\mu\text{g}$  / l oder 7,0 ng / l zustande.

Im täglichen Leben drückt man Konzentrationen meist in Prozenten oder Promille aus: Angaben wie „40prozentiger Doppelkorn“ oder – als mögliche Folge – „1,2 Promille Alkohol im Blut“ sind ohne weitere Erklärung jedem verständlich.

Für die oben erwähnten sehr kleinen Konzentrationen von Milli-, Mikro- oder gar Nanogramm im Liter Wasser hat sich nun ein in den USA aufkommendes System auch bei uns gut eingeführt, das praktisch eine Ausweitung des bekannten Prozent- und Promille-Schemas darstellt: Dies sind die auch in der Tagespresse und in Rundfunk und Fernsehen immer wieder genannten ppm und ppb. Die Buchstaben sind Abkürzungen aus dem Englischen und bedeuten:

- ppm: part per million,  
also Teile auf 1 Million Teile, und zwar unabhängig vom angewendeten Maß-System. 5 mg Kochsalz im Liter Wasser entsprechen somit 5 ppm, denn der Liter Wasser hat 1000 Kubikzentimeter, die auch 1000 g oder 1 000 000 mg entsprechen.
- ppb: part per billion:  
Hier tritt die Schwierigkeit auf, daß es im amerikanischen Englisch nicht den Begriff der Milliarde gibt, sondern für diese Zahl das Wort „billion“ steht, während „unsere“ Billion im amerikanischen Englisch „trillion“ heißt. Deshalb muß man sehr gut aufpassen, und 6,2  $\mu\text{g}$  Eisen pro Liter sind also 6,2 ppb Eisen im Wasser, d. h. 6,2 Teile Eisen auf eine Milliarde Teile Wasser.
- ppt: part per trillion und
- ppq: parts per quadrillion  
sind dann noch jeweils ein Tausendstel der vorherigen Einheit.

Der Verband der Chemischen Industrie (VCI) in Frankfurt/M. hat in seiner Broschüre „Wasser“ (Chemie und Umwelt) alles bisher Erläuterte in einer übersichtlichen Tabelle zusammengefaßt, die nachstehend verkürzt wiedergegeben ist:

Beispiel: Ein Zuckerwürfel, aufgelöst in			
1 Prozent ist 1 Teil von hundert Teilen	10 Gramm pro Kilogramm	10 g / kg	0,27 Litern, das sind 2 Tassen
1 Promille ist 1 Teil von tausend Teilen	1 Gramm pro Kilogramm	1 g / kg	2,7 Litern, also 3 ½ Weinflaschen
1 ppm (part per million) ist 1 Teil von 1 Million Teilen	1 Milligramm pro Kilogramm	0,001 g / kg (10 <sup>-3</sup> )	2.700 Litern, entsprechend einem Straßen-Tankzug
1 ppb (part per billion) ist 1 Teil von 1 Milliarde Teilen (b = billion, amerik. für Milliarde)	1 Mikrogramm pro Kilogramm	0,000 001 g / kg (10 <sup>-6</sup> )	2,7 Millionen Litern (mittlerer Öltanker)
1 ppt (part per trillion) ist 1 Teil von 1 Billion Teilen (t = trillion, amerik. für Billion)	1 Nanogramm pro Kilogramm	0,000 000 001 g / kg (10 <sup>-9</sup> )	2,7 Milliarden Litern (also etwa in der Talsperre Östertal bei Attendorf im Sauerland)
1 ppq (part per quadrillion) ist 1 Teil von einer Billiarde (q = quadrillion, amerik. für Billiarde)	1 Picogramm pro Kilogramm	0,000 000 000 001 g / kg (10 <sup>-12</sup> )	2,7 Billionen Litern (d. h. im Starnberger See)

Beispiel: Ein Zuckerwürfel aufgelöst in	0,27 Liter	<b>1 % Prozent</b> ist 1 Teil von hundert Teilen	<b>10 Gramm</b> pro Kilogramm	10 g / kg
	2,7 Liter	<b>1 Promille</b> ist 1 Teil von tausend Teilen	<b>1 Gramm</b> pro Kilogramm	1 g / kg
	2700 Liter	<b>1 ppm</b> (part per million) ist 1 Teil von 1 Million Teile	<b>1 Milligramm</b> pro Kilogramm	0,001 g / kg (10 <sup>-3</sup> )
	2,7 Millionen Liter	<b>1 ppb</b> (part per billion) ist 1 Teil von 1 Milliarde Teile (b = billion, amerik. für Milliarde)	<b>1 Mikrogramm</b> pro Kilogramm	0,000 001 g / kg (10 <sup>-6</sup> )
	2,7 Milliarden Liter	<b>1 ppt</b> (part per trillion) ist 1 Teil von 1 Billion Teile (t = trillion, amerik. für Billion)	<b>1 Nanogramm</b> pro Kilogramm	0,000 000 001 g / kg (10 <sup>-9</sup> )
	2,7 Billionen Liter	<b>1 ppq</b> (part per quadrillion) ist 1 Teil von 1 Billiarde Teile (q = Quadrillion, amerik. für Billiarde)	<b>1 Picogramm</b> pro Kilogramm	0,000 000 000 001 g / kg (10 <sup>-12</sup> )

Die Frage der „Anschaulichkeit“ stellt sich natürlich auch hier. Das Beispiel des Zuckerwürfels ist dabei sicher hilfreich. Sehr bekannt geworden ist für 1 ppm auch der Vergleich „1 Prussian pro Munich“ = 1 Preuße in München; man geht von der freilich irrigen Annahme aus, daß die eine Million Einwohner der Isarmetropole ausschließlich bajuwarischer Herkunft sei und quasi als schwarzes Schaf nur ein Preuße, eben 1 ppm (1 part per million) darunter zu finden wäre. Übertragen auf die moderne chemische Analytik ist die Suche nach einer so geringen Verunreinigung in einem Substrat keine aufregende Sache. Man fahndet hier nach viel kleineren „Mengen“, die sich dann in ppb ausdrücken lassen. Meist ist man aber dann doch sehr verblüfft durch den Hinweis, daß bereits eine fünfköpfige Familie mehr als 1 ppb der gesamten Menschheit (4,7 Milliarden) darstellt, wobei also alle Chinesen, Russen, Amerikaner, Deutschen, Monegassen, Schweden, Türken, Luxemburger und und und ... einbezogen sind. Die Analytik im ppt-Bereich entspräche dann etwa der Suche nach einem oder mehreren Roggenkörnern in 100 000 Tonnen Weizen, für die man einen 20 km langen Güterzug benötigen würde.

Alle diese Beispiele zeigen, daß die chemische Analytik in den letzten drei Jahrzehnten in Meßbereiche vorgestoßen ist, die vorher kaum denkbar waren und für die wir heute quasi „Eselsbrücken“ des Verständnisses und der Vorstellbarkeit entwickeln müssen. Ein großer Teil des Verdienstes an dieser Entwicklung kommt den physikalischen und chemischen Laboratorien der Industrie zu, die gerade auf dem Pflanzenschutz- und Arzneimittelsektor von sich aus Analysenmethoden ausgearbeitet hat, die eine möglichst lückenlose Erfassung aller Wirkungs- und Zerfallsmechanismen ihrer Produkte gewährleisten.

Eine extrem genaue Messung, auch bei winzigsten Spuren einer Substanz, ist aber nur die eine, und zwar die einfachere Seite dieser Art Forschung: Eine Meßreihe ist so lange ein Zahlenfriedhof, bis sie ausgewertet ist.

Bereits der Begriff „Auswertung“ zeigt, daß hier zu dem objektiv und durch technische Weiterentwicklung des immer besser Meßbaren eine neue, mehr subjektive Komponente hinzukommt: Dies ist die abwägende Einordnung der gefundenen Meßdaten in die schon bekannten Tatsachen des bearbeiteten Fragenkomplexes. Die aktuelle Behandlung vieler Themen, z. B. des Umweltschutzes in der Öffentlichkeit, zeigt, daß die sachgerechte Auswertung von Befunden im Mikro- und Nanogramm-Bereich problematisch sein kann. Deshalb seien hier zum Abschluß noch drei Hinweise auf Fehlerquellen gegeben, durch die aus einem recht einfachen Sachverhalt bisweilen eine oft sehr effektvolle, dennoch aber unrichtige und irreführende Story werden kann:

- Wenn man heute öfter als früher vom Auffinden bestimmter Schadstoffe im Boden, im Wasser oder in Lebensmitteln liest, so ist dies in vielen Fällen eben auf die extreme Empfindlichkeit moderner Analytik zurückzuführen, durch die sich auch noch geringste Spuren finden lassen. Meist waren die genannten Stoffe auch vorher schon vorhanden, vielleicht sogar in höheren Konzentrationen als heute. Sehr drastische Beispiele hierfür sind farbige Kirchenfenster, bleigefäßte Butzenscheiben, Zinnkrüge und glasierte Keramik früherer Zeiten, die zwar handwerklich und nicht industriell, aber unter ganz unvorstellbaren Arbeitsbedingungen entstanden sind: Der Qualm aus den Glas- und Erzhütten färbte weithin die Landschaft; es waren Stäube von Schwermetalloxiden, die man „Hüttenrauch“ nannte. Eine bestimmte Sorte davon hieß „Giftmehl“, denn es war Arsenik.
- Gerade bei der Diskussion über Befunde von Fremdstoffen in Lebensmitteln wird oft versäumt, ein vorliegendes Analysenergebnis in Bezug zu gleichzeitig anwesenden **natürlichen** Giftstoffen zu setzen, die das betreffende Lebensmittel von sich aus enthält. Hier ist die Natur keineswegs zimperlich. Nicht nur Tollkirsche, Seidelbast und der Knollenblätterpilz enthalten Gifte, sondern auch die brave Kartoffel bringt es auf beachtliche Gehalte an dem sehr giftigen Alkaloid Solanin, und die harmlose Erdbeere verdankt ihren Wohlgeschmack einer ganzen Reihe recht giftiger Substanzen wie Azeton, Crotonaldehyd, Methanol, Acrolein usw.
- Schließlich ist bei derart winzigen Konzentrationen die mögliche Wirkung eines bestimmten Stoffes nicht mehr linear von seiner Menge abhängig. Hier werden die Verhältnisse oft sehr kompliziert; gerade bei den Schwermetallen muß man dabei auf Überraschungen gefaßt sein: Abgesehen davon, daß das Eisen im Blut ja auch als „Schwermetall“ bezeichnet werden muß, sei darauf hingewiesen, daß das lebensnotwendige Vitamin B<sub>12</sub> ein organischer Kobaltkomplex ist. Das in höheren Dosen giftige Chrom, das immer wieder als Schadstoff in Abwässern diskutiert wird, bildet das Zentralatom eines komplizierten Enzyms, das den Insulin-Haushalt des menschlichen Körpers regelt. Man rechnet heute, daß etwa 250 µg Cr pro Tag für den Menschen nicht nur unschädlich, sondern für seine Gesundheit notwendig sind.

Alle diese Beispiele sollten auf gar keinen Fall als ein „Herunterspielen von Gefahren“ verstanden werden, auch wenn die Werte oft noch so klein erscheinen. Das Gegenteil ist richtig: Auch Nanogramm-Beträge können sich unter Umständen über bestimmte Organe und die Nahrungskette kumulieren und wirksam werden. Das Messen kleinster Spuren wurde ja gerade dazu entwickelt, solche Gefahren erkennen und abwehren zu helfen. Dazu sind aber sachgerechte Handhabung und Auswertung unerlässlich.